

РАДИАЛЬНЫЕ УСИЛИЯ ПРИ РАСКАТКЕ ОТВЕРСТИЙ ШАРИКОВОЙ ОПРАВКОЙ

В. Д. ВАРЛАКОВ

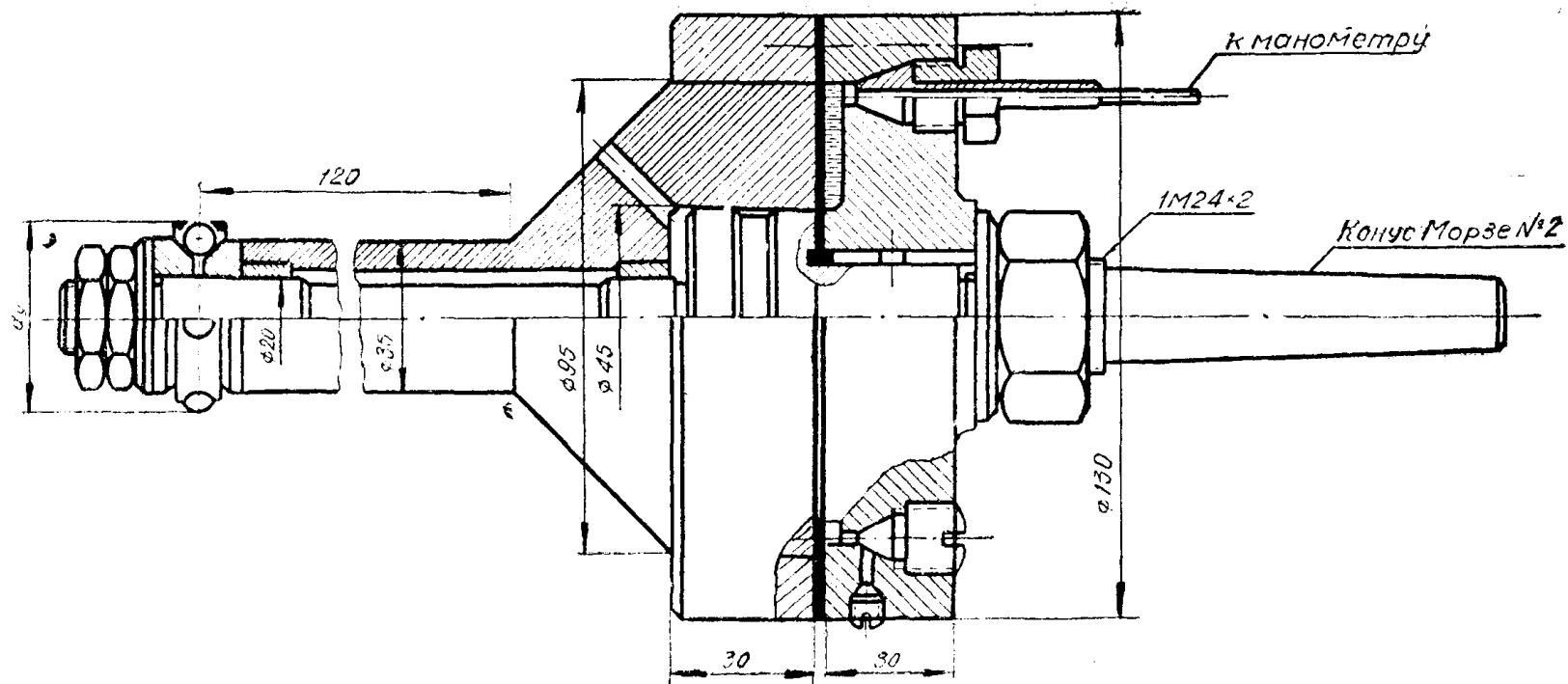
(Представлено проф., докт. техн. наук А. Н. Ереминым)

Вопрос о возникающих при раскатке внутренних поверхностей, радиальных силах совершенно не освещен в литературе. Знание величины этих сил необходимо для возможности производить правильный расчет конструкций инструмента для обработки отверстий раскаткой. Данные всех исследований о необходимых, для поверхностного наклепа или сопровождающих этот наклеп, давлениях относятся исключительно к внешним поверхностям, рассматривая вопрос получения наклепа на внешних поверхностях. Исследователи обычно задавались вполне определенными давлениями и затем выявляли, как эти давления влияют на глубину наклепа. Так было в исследованиях Феппля [1], Хергера [2] и ряда других. Все они ставят глубину наклепа в зависимость от давления, создаваемого или создающегося при обработке. В наших опытах [10] получено полное соответствие глубины проникновения наклепа с данными других исследователей. Однако, вопрос изменения глубины наклепа нами рассматривался в зависимости от толщины деформируемого слоя.

В настоящей статье автор освещает вопросы методики определения величины радиальных давлений и их зависимости от ряда факторов.

Методика проведения опытов и установка для измерения радиальных усилий

В наших исследованиях обработка отверстий производилась шариковой оправкой. Основным давлением, возникающим на шариках, является радиальное давление. Это давление вызывается упругостью и пластичностью обрабатываемого материала. При постановке опытов по определению величины радиальных давлений при раскатке отверстий шариковой оправкой автором был сконструирован гидравлический динамометр, изготовленный в лаборатории резания металлов Томского политехнического института. Чертеж динамометра дан на фиг. 1, и схема его работы представлена на фиг. 2. Здесь 1—раскатываемый образец, 2 и 4—конуса из закаленной стали, между которыми помещены шарики 3. Угол наклона конусов равен 45° , вследствие чего величина реакции вдоль стержня динамометра равна суммарному давлению на шарики. Конус 2 через стержень 9 жестко связан с корпусом динамометра, конус же 4 сидит на стержне 9 свободно и может перемещаться вдоль этого стержня вместе с поршнем 10. Поршень при перемещении влево воздействует на резиновую мембрану 8, герметически закрывающую полость 6. Полость 6 заполнена смесью глицерина с водой и трубкой соединена с манометром 5.

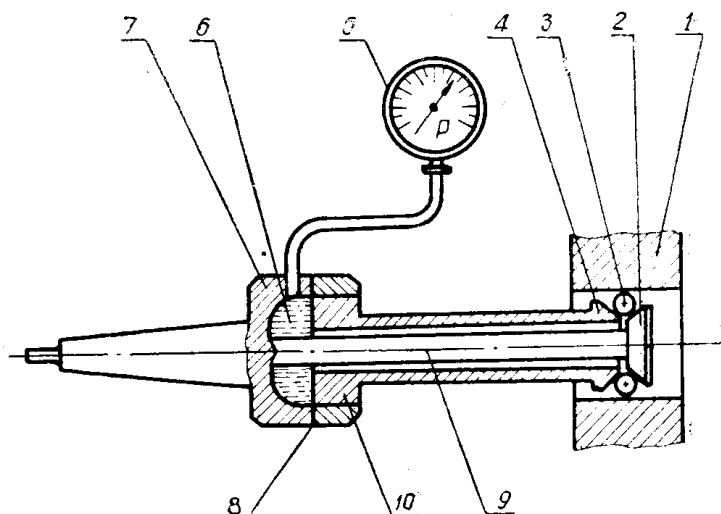


Фиг. 1

Гидравлический динамометр для измерения радиальных усилий при раскатке отверстий

Давление, возникающее на шариках в процессе раскатки отверстия, через поршень передается жидкости и манометру. Вредные сопротивления динамометра нами исключены при его тарировке.

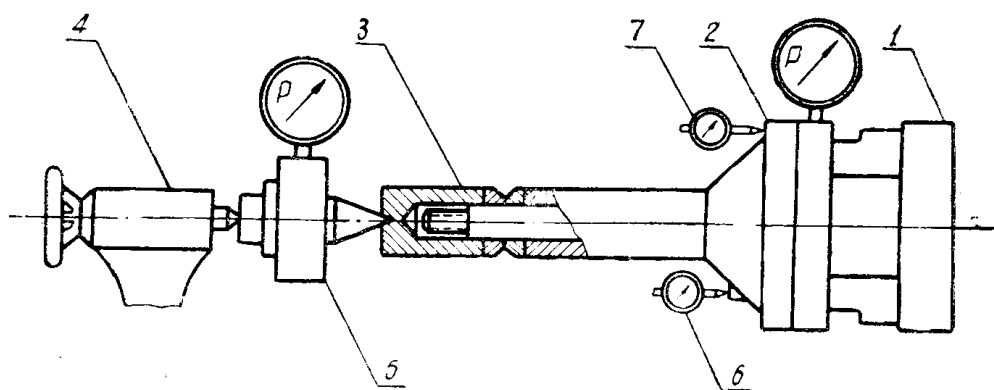
Тарировка динамометра проводилась следующим образом. В патрон передней бабки мощного токарного станка зажималась гильза 1 (фиг. 3),



Фиг. 2

Схема гидравлического динамометра

на которую опирался корпус динамометра; при этом обеспечивалось точное его центрирование. При тарировке нам необходимо было создать давления, аналогичные рабочим. Центром задней бабки через стакан 3 и создавались эти давления на поршень. Контроль величины давления центра задней бабки 4 на поршень динамометра осуществлялся с помощью контрольного динамометра 5, помещенного между центром 4 и стаканом 3.



Фиг. 3

Схема тарировки динамометра

Одновременно производилась запись показаний контрольного и нашего манометров. На основании полученных данных строился тарировочный график. Одновременно с тарировкой нагрузки производилась тарировка перемещения поршня, необходимая нам для определения истинного размера оправки динамометра под нагрузкой, так как здесь с увеличением нагрузки возрастает и перемещение поршня. Метод определения истинного размера гидравлической оправки будет описан ниже.

Тарировочный график перемещения поршня строился следующим образом. Мы воспользовались двумя индикаторами (фиг. 3). Шпиндель одного из них (6) опирался на поршень, шпиндель второго (7) на корпус динамометра. Разность показаний первого и второго индикатора дает истинное значение перемещения поршня при соответствующей нагрузке относительно корпуса динамометра.

Опыты по определению радиальных усилий проводились на токарном станке завода им. Куйбышева. Динамометр своим хвостовиком закреплялся на суппорте станка точно по линии его центров.

Опыты были проведены по различным углеродистым сталям, при разных подачах, скоростях и числе проходов. В качестве образцов для испытаний брались кольца высотой 23 мм с отверстиями, предварительно обработанными двухкратным развертыванием.

Зависимость радиальных усилий от режима раскатки

Прежде чем рассматривать возникающие при раскатке радиальные усилия, остановимся на особенностях нашего динамометра.

Под действием радиальных усилий, возникающих при раскатке отверстий, подвижной конус динамометра воздействует на его поршень. Перемещение подвижного конуса может быть получено только взаимным воздействием на него нескольких шариков, действующих одновременно и на обрабатываемую поверхность. Если рассматривать шарики оправки динамометра подобными шарикам упорного подшипника, то практически оказывается, что положение подвижного конуса определяется взаимным расположением трех шариков. Эти три шарика воспринимают на себя воздействие обрабатываемого материала и передают его поршню динамометра. Все остальные шарики лишь выравнивают свое положение относительно первых трех. Давление, возникшее на всех шариках, кроме трех, не вызывает дополнительного перемещения поршня. Высказанное нами предположение целиком подтверждается экспериментом (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Влияние количества шариков на величину радиального давления

№ образцов	Диаметр установочного кольца	Давление установки, атм	$\frac{n}{\text{оборотов мин}}$	$\frac{s}{\text{мм оборот}}$	Рабочее давление в кг	Количество шариков
109	38,1	1,5	350	0,398	320	8
186	38,1	1,5	350	0,398	320	8
149	38,1	1,5	350	0,318	315	6
154	38,1	1,5	350	0,318	320	6
78	38,1	1,5	350	0,203	325	4
185	38,1	1,5	350	0,203	320	4
151	38,1	1,5	350	0,159	320	3
153	38,1	1,5	350	0,159	320	3

Как видно из таблицы, количество шариков менялось от 8 до 3, при этом наблюдалась стабильность показаний манометра, что свидетельствует об отсутствии влияния количества шариков на величину суммарной радиальной силы. Количество шариков меньше трех мы не брали, так как в этом случае потребовались бы дополнительные опоры для удержания двух шариков в строго диаметральной позиции или специальное устройство, создающее давление на один шарик (при диаметре шарика меньше диаметра отверстия). Мы же поставили перед собой задачу определить радиальные силы, возникающие при раскатке отверстий и вызываемые упругостью обрабатываемого материала.

При работе с жесткой оправкой вопрос размера оправки решался очень просто — путем измерения его точным штангенциркулем или микрометром; полученный, таким образом, размер и является рабочим. При работе же с гидравлической оправкой дело обстоит иначе. Величина давлений нами фиксируется по показаниям манометра, для чего мы должны воздействовать на резиновую мембрану поршнем. Отсюда в работе размер оправки будет иным, нежели при установке его в ненагруженном состоянии. Установка размера с помощью микрометра или штангенциркуля в данном случае невозможна, так как наличие массивного поршня исключает гарантию его плотного прилегания к мембране динамометра без создания предварительного натяга на конусах. Получение же такого натяга с помощью микрометра исключается. Указанные обстоятельства заставили нас использовать следующую методику установки размера оправки. Нами было изготовлено закаленное шлифованное кольцо размером 38,1 мм. Одев кольцо на оправку, мы создавали некоторое давление предварительного натяга. Предположим, это давление равно 1,5 атм, перемещение поршня от 0 до 1,5 атм нам известно из тарифовочного графика и равно 0,03 мм. В работе возникло давление, равное 5,7 атм, при этом поршень переместился на 0,23 мм. Тогда действительный размер оправки будет:

$$d_y = 38,1 + 0,03 - 0,23 = 37,9 \text{ мм.}$$

Меняя давление предварительного натяга, мы можем получить различные диаметры установки при одном и том же кольце. Так, при $P_{\text{уст}} = 2,7 \text{ атм}$ кольцо диаметром 38,1 мм перемещение поршня при установке будет 0,1 мм.

Данная методика нами использовалась для изменения диаметра установки оправки и выявления влияния разности диаметров установки и отверстия на величину радиальных сил.

Правильность наших рассуждений целиком подтвердилась проведенной проверкой глубины проникновения наклепа. Проверка состояла в том, что мы на графике фиг. 4 провели прямую, соответствующую глубине проникновения наклепа при различных разностях диаметров, получив ее по формуле [10] для данных скорости и подачи. После этого нанесли точки, соответствующие глубинам проникновения при разных разностях диаметров оправки и отверстия в данной серии опытов. Из графика видно полное соответствие расчетной прямой и экспериментальных точек.

Зависимость радиальных сил, возникающих при раскатке отверстий, от разности диаметров представлена на графике фиг. 5.

Из графика видно, что величина радиального давления находится в зависимости от толщины деформированного слоя и может быть выражена формулой

$$P = C_p \delta d^y, \quad (1)$$

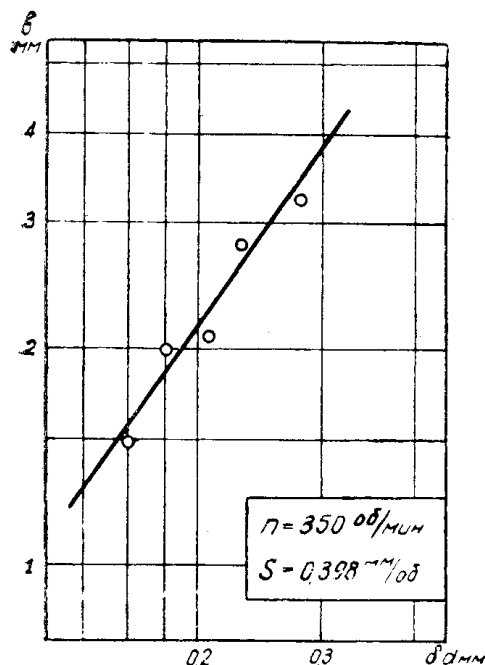
где P — радиальное давление,
 δd — разность диаметров „раскатки“ и отверстия до обработки,

C_p — постоянный коэффициент, зависящий от материала и условий опыта,

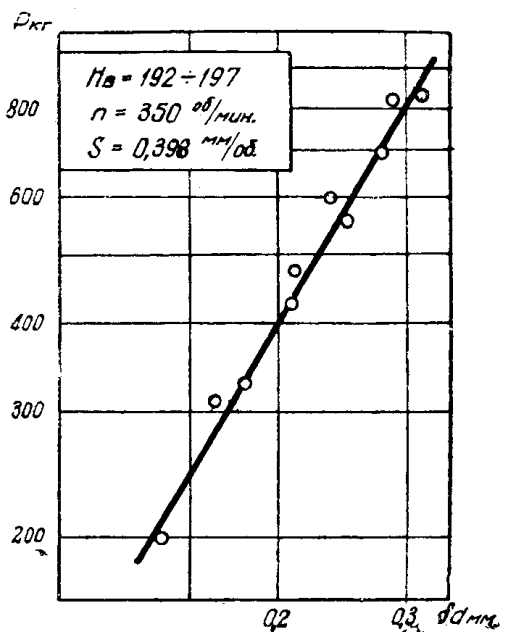
u — показатель степени, зависящий от материала.

Для стали твердостью $H_b = 197$ и диаметра шариков 7 мм уравнение (1) запишется

$$P = 6790 \delta d^u. \quad (2)$$



Фиг. 4. Зависимость глубины проникновения наклепа от разности диаметров

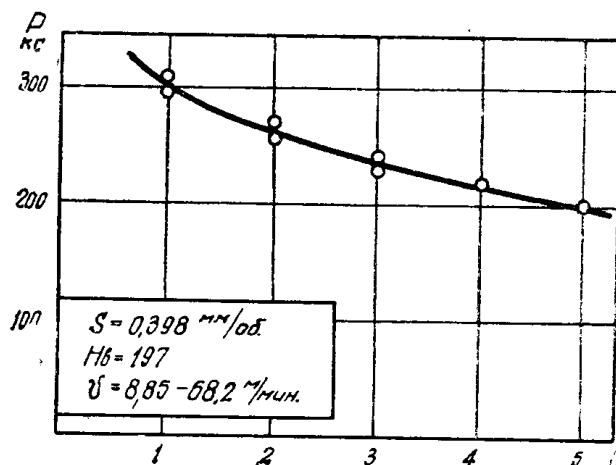


Фиг. 5. Зависимость радиальной силы от разности диаметров

Далее мы провели серию опытов по выявлению влияния скорости и числа проходов по слою на величину радиальной силы. Скорость менялась в пределах от 8,85 до 68,2 м/мин, число проходов по слою — от 1 до 5 (фиг. 6 и 7).

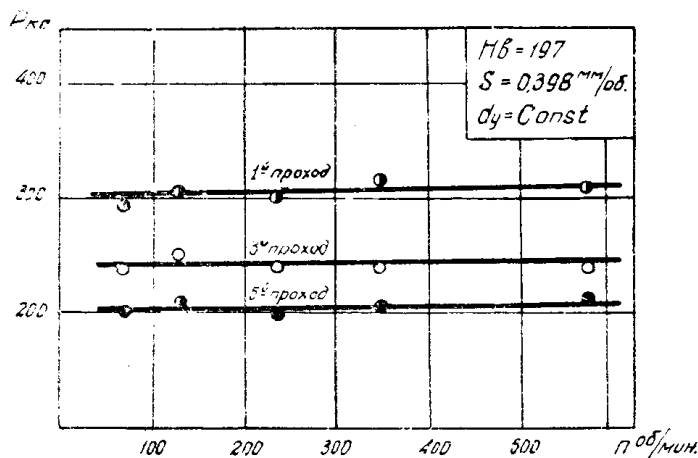
Из обоих графиков видно полное отсутствие влияния скорости раскатки на величину радиального давления, возникающего при раскатке отверстий. Это объясняется тем, что в опытах нами сохранялась постоянная разность диаметров оправки и отверстия, то есть толщина деформированного слоя.

Эти графики показывают снижение радиального давления по мере увеличения числа проходов по слою. Данное явление объясняется тем, что после каждого прохода отверстие образца или детали увеличивает свой диаметр на некоторую, хотя и небольшую величину, размер же оправки при этом не меняется. Отсюда слой металла, который подвергается деформации, постепенно уменьшает-



Фиг. 6. Зависимость радиальной силы от числа проходов и скорости

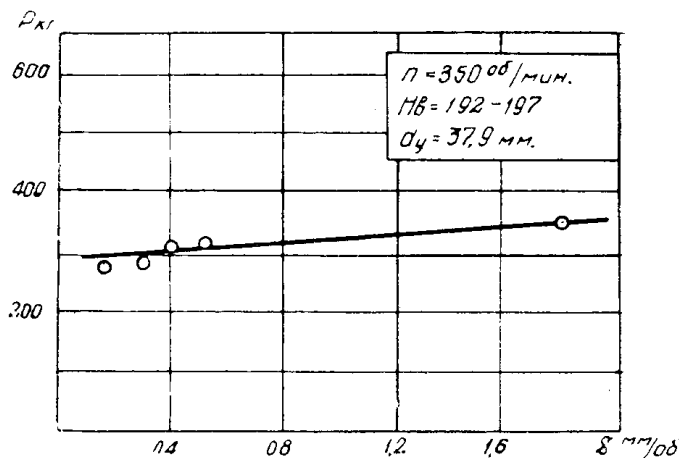
ся и, следовательно, естественно снижение усилия, необходимого на его деформацию. В пределе увеличение диаметра отверстия может быть таково, что оно окажется равным, первоначальной разности диаметров оправки и отверстия, и отверстие станет равным диаметру оправки. При этом давление станет равным нулю.



Фиг. 7. Зависимость радиальной силы от числа проходов и скорости

При определении влияния подачи на величину радиального давления мы меняли подачу в пределах от 0,018 до 1,760 мм/оборот (фиг. 8).

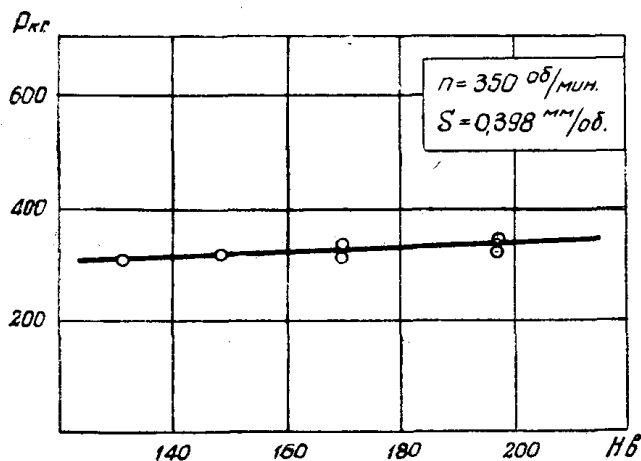
Из графика фиг. 8 видно некоторое повышение радиального давления с ростом подачи. Это повышение давления является естественным, так как в данном случае имеет место увеличение объема деформируемого металла. Аналогичное явление наблюдается при резании, где с увеличением подачи также наблюдается рост усилия резания [3], правда, несколько интенсивнее, нежели в нашем случае.



Фиг. 8. Зависимость радиальной силы от подачи

Далее мы провели опыты по выявлению влияния твердости стали на величину радиального давления (фиг. 9). С увеличением твердости стали величина радиального давления растет. Опыты показали, что давление растет с ростом H_B . Несколько меньший прирост радиальной силы противодействия металла внедрению оправки (6,45%), по сравнению с приростом твердости (50,45%), может быть объяснен изменением пластичности стали.

В заключение нами была поставлена задача выяснить зависимость радиальной силы от диаметра обрабатываемого отверстия и шарика. По имеющимся данным можно было предполагать, что эта зависимость должна удовлетворять закону подобия. Закон подобия впервые был сформулирован Томпсоном и затем разработан Барром [7]. Принцип подобия Барра гласит: „Подобные тела из одинакового материала при приложении одинаковой



Фиг. 9. Зависимость радиальной силы от первоначальной твердости стали

по величине, напряжению и распределению, нагрузки напрягаются и деформируются в одинаковой степени как в пределах, так и за пределами упругости, пропорционально квадрату их предельных размеров“. Как [8] также устанавливает эквивалентность деформации в геометрически подобных телах из одинакового материала величине работы, которая пропорциональна весу или объему этих тел. Та же закономерность подтверждается в исследованиях Мейера [9] и ряда других исследователей.

Как следствие закона подобия можно написать:

$$\frac{P_1}{D_1^2} = \frac{P_2}{D_2^2} = \dots = \frac{P_n}{D_n^2}, \quad (3)$$

где P — прилагаемая нагрузка,
 D — диаметр шарика.

Данная закономерность справедлива при одинаковой степени деформации.

В наших опытах бралась постоянная разность диаметров или толщина деформированного слоя, постоянная скорость накатки и подачи на оборот изделия. Материал во всех случаях был также постоянен. Результаты опытов приведены в табл. 2.

Таблица 2
 Влияние диаметра шарика на величину радиальной силы

№ образцов		мм	Диаметр шарика	Радиальная сила в кг	
170	197	0,18	7,0	340	6,94
109	197	0,18	7,0	330	6,74
118	197	0,18	9,2	620	7,28
116	197	0,18	9,2	600	7,10
207	197	0,18	12,0	990	6,87
204	197	0,18	12,0	1030	7,15

Из приведенной таблицы видно, что закон подобия в нашем случае целиком справедлив, поэтому из уравнения (3)

$$P_n = \frac{P_1 D_n^2}{D_1^2}. \quad (4)$$

Приняв $P_1 = C_p \delta d^y$ и подставив в уравнение (4), получим:

$$P_n = \frac{C_p S d^y D_n^2}{D_1^2}. \quad (5)$$

Если подставить в формулу (5) конкретные значения C_p , y и $D_1 = 7$ мм, то

$$P_n = \frac{6790 \delta d^{1.75} D_n^2}{49} = 13,85 d^{1.75} D_n^2. \quad (6)$$

Пользуясь уравнением (6), можно определить значение радиальной силы, возникающей на оправке при раскатке стали с $H_s = 197$ для любой разности диаметров оправки и отверстия и любого диаметра шариков.

Знание суммарного давления при раскатке отверстий нам необходимо для расчета оправок на прочность. Как показано выше, увеличение числа проходов по слою ведет к снижению радиальной силы, а первоначальная твердость материала и подача незначительно влияют на его величину (влияние скорости раскатки отсутствует). Поэтому в уравнение (5) нет надобности вводить дополнительные члены, увязывающие радиальное давление с числом проходов, подачей и первоначальной твердостью материала. Максимум давления получается при первом проходе, наибольших подаче и твердости материала. Введение в формулу зависимости от числа проходов дает снижение значения радиального давления, а наибольшее давление оправка будет испытывать при первом проходе, отсюда уравнение (5) может быть принято за расчетное. Подача влияет на это давление очень мало, и этим влиянием можно пренебречь. Уравнение (6) дает значения радиального давления для стали с $H_s = 197$, то есть для довольно твердой конструкционной стали. При расчете оправки для обработки более мягких сталей по этому уравнению будет получаться некоторое (очень небольшое) увеличение ее прочности. Обработка сталей с более высокой первоначальной твердостью вряд ли встретится в практике, так как в этом случае будет иметь место незначительный прирост твердости поверхностного слоя за счет наклепа. При наличии большого содержания углерода в таких сталях повышение твердости может быть получено за счет закалки.

В связи с этим, уравнение (6) может быть предложено для расчета радиального давления на шариковых оправках, предназначенных для обработки всех конструкционных сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Феппель О., Беккер Е., Гейдекамф Г. Длительное испытание металлов, ОНТИ, 1935.
2. Herger, Die Werkzeugmaschine, № 19, 1937.
3. Нормирование станочных работ, Машгиз, 1949.

4. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела, т. 1, 2, 3, Томск, Издательство „Красное знамя“.
 5. О д и н г. Прочность металлов, ОНТИ, 1937.
 6. О д и н г. Современные методы испытания металлов, ОНТИ, 1937.
 7. Нейль Г. О. Твердость металлов и ее измерение. Металлургиздат, 1940.
 8. K i e k, F., Das Gesetz d. proportionalen Widerstände Leipzig, 1885.
 9. M e h e r, E., ZdvDJ, Н. 52, 1908.
 10. В а р л а к о в В. Д. Наклеп при накатке отверстий, Томск, Известия ТПИ, т. 75, 1954.
-